Votre avenir nous engage

Diagramme psychrométrique

Utilisation

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE L'AIR HUMIDE

Une installation de climatisation a pour rôle de maintenir à des conditions fixées à l'avance l'état de l'air dans le local que l'on veut conditionner.

Pour ce faire, on utilise des procédés pour chauffer, refroidir, humidifier et déshumidifier l'air.

Pour faciliter la représentation des transformations de l'air et le calcul des différents éléments de l'installation de climatisation on utilise le "**diagramme psychométrique**" de l'air humide.

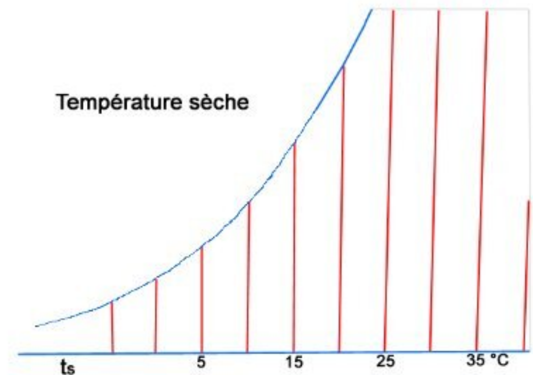
Un tel diagramme précise, pour tous les états que peut occuper l'air humide, ses caractéristiques physiques :

1. **Température de bulbe sec**

L'axe horizontal représente une grandeur fondamentale du diagramme psychrométrique que l'on appelle plus couramment :

température sèche : t_s en °C.

Les lignes verticales, appelées isothermes sont des lignes où la température sèche est constante.

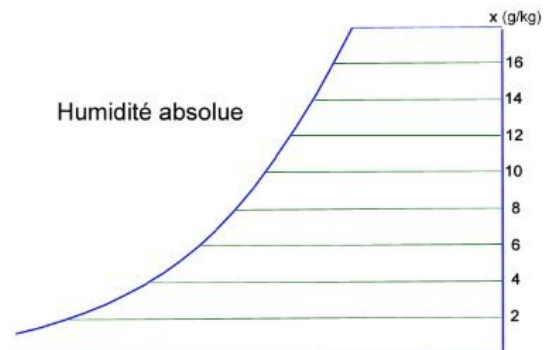


2. **Humidité absolue**

L'axe vertical de droite représente cette autre grandeur fondamentale qui indique la teneur en vapeur d'eau de l'air considéré.

L'humidité absolue **x** (ou **w**) s'exprime en *gramme* d'eau par *kilogramme* d'air (**g/kg**).

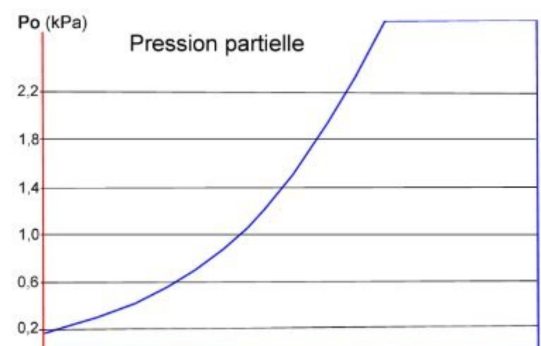
Les lignes horizontales, appelées *isohydres*, sont des lignes à teneur en vapeur d'eau constante.



3. **Pression partielle**

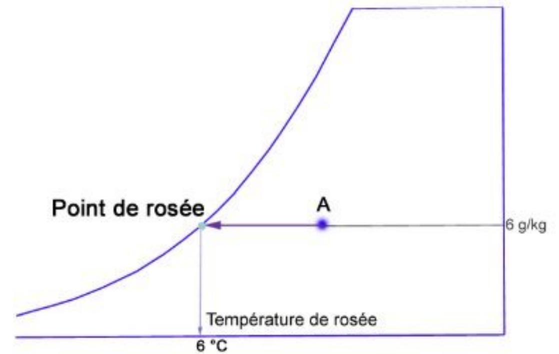
L'axe vertical de gauche représente la pression partielle **Po** de la vapeur d'eau contenue dans l'air considéré. Elle s'exprime en **kPa** (kilo Pascal) ou en **mbar** (millibar).

La concentration en vapeur d'eau peut augmenter (en suivant une *isotherme*) jusqu'à ce que l'air atteigne l'état de saturation ; cet état est représenté par la courbe incurvée la plus à gauche qui permet de déterminer la pression de saturation **Psat** lue sur l'axe des pressions.



4. Température de rosée

Si on se déplace à partir d'un point **A** du diagramme, sur une *isohydre*, de droite à gauche on atteint la courbe de saturation en un point appelé ***point de rosée***, dont la température lue sur l'axe horizontal est la **température de rosée de A** : **tr**.

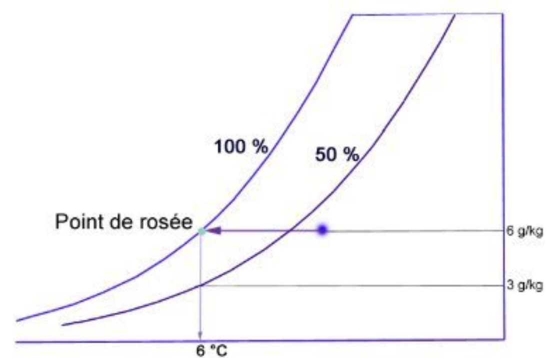


5. Humidité relative

L'air situé sur la ligne de saturation, citée plus haut, est saturé de vapeur d'eau. On dit que son humidité relative **Hr** est de 100 %. C'est une ligne à humidité relative constante.

Si l'on divise la teneur en vapeur d'eau par deux, l'air se trouve sur une ligne saturée de moitié, c'est-à-dire à **Hr** = 50 % (on peut écrire aussi : **φ** = 50 %).

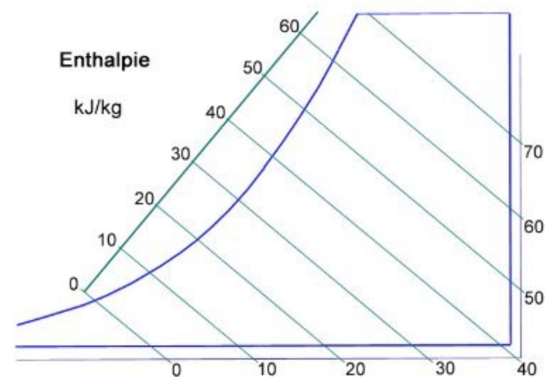
On peut tracer ainsi un réseau de courbes à différentes valeurs d'humidité relative constante.



6. Enthalpie

L'enthalpie **h** est la quantité de chaleur totale de l'air humide considéré. Elle s'exprime en **kJ/kg** (ou en kcal/kg, autrefois). On considère que, l'air dont sa température **ts** = 0 °C et sa teneur en vapeur d'eau **x** = 0 g/kg, a une enthalpie **h** = 0 kJ/kg.

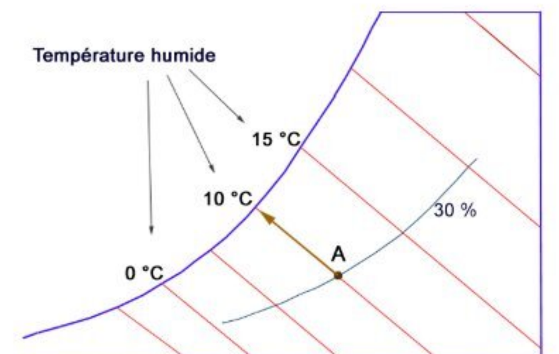
Le réseau de droites obliques perpendiculaires à l'échelle des enthalpies constitue des lignes à enthalpie constante, appelées *isenthalpes*.



7. Température de bulbe humide

Si d'un point **A** du diagramme on se déplace sur une *isenthalpe,* on atteint la courbe de saturation en un point dont la température lue sur l'axe horizontal est appelée communément température humide **th** du point initial considéré.

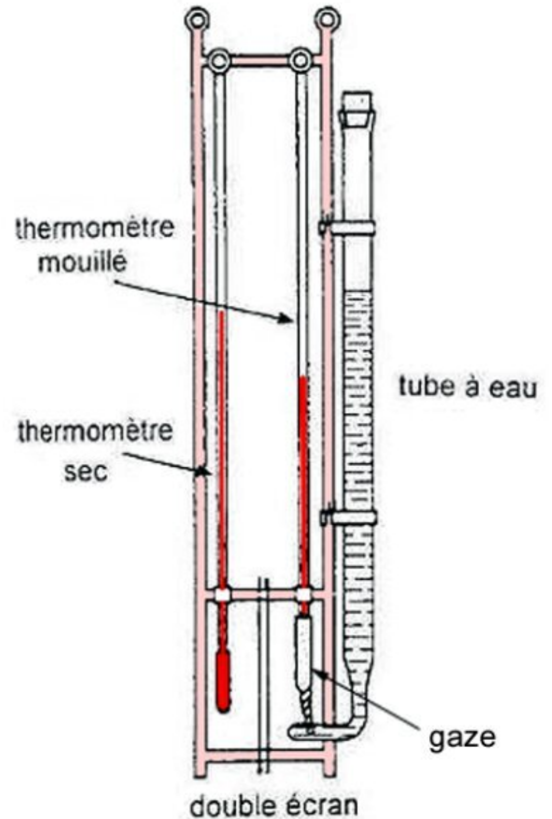
On mesure les températures sèche et humide au moyen d'un appareil comportant deux thermomètres, appelé *psychromètre*.



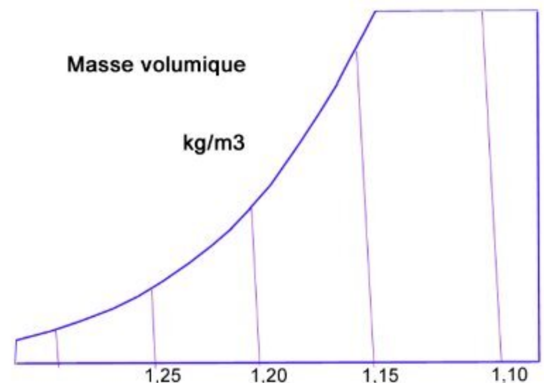
Psychromètre

Pour mesurer la température sèche
et la température humide de l'air.





8. Masse volumique



Les lignes légèrement inclinées vers la gauche sont des droites à masse volumique ρ constante. Elles s'expriment en kg/m^3.

Pour déterminer exactement l'état dans lequel se trouve un air humide considéré pris à une pression barométrique donnée, il suffit d'en connaître deux grandeurs physiques. Les autres peuvent être déterminées à l'aide du diagramme psychométrique.

Exemple :

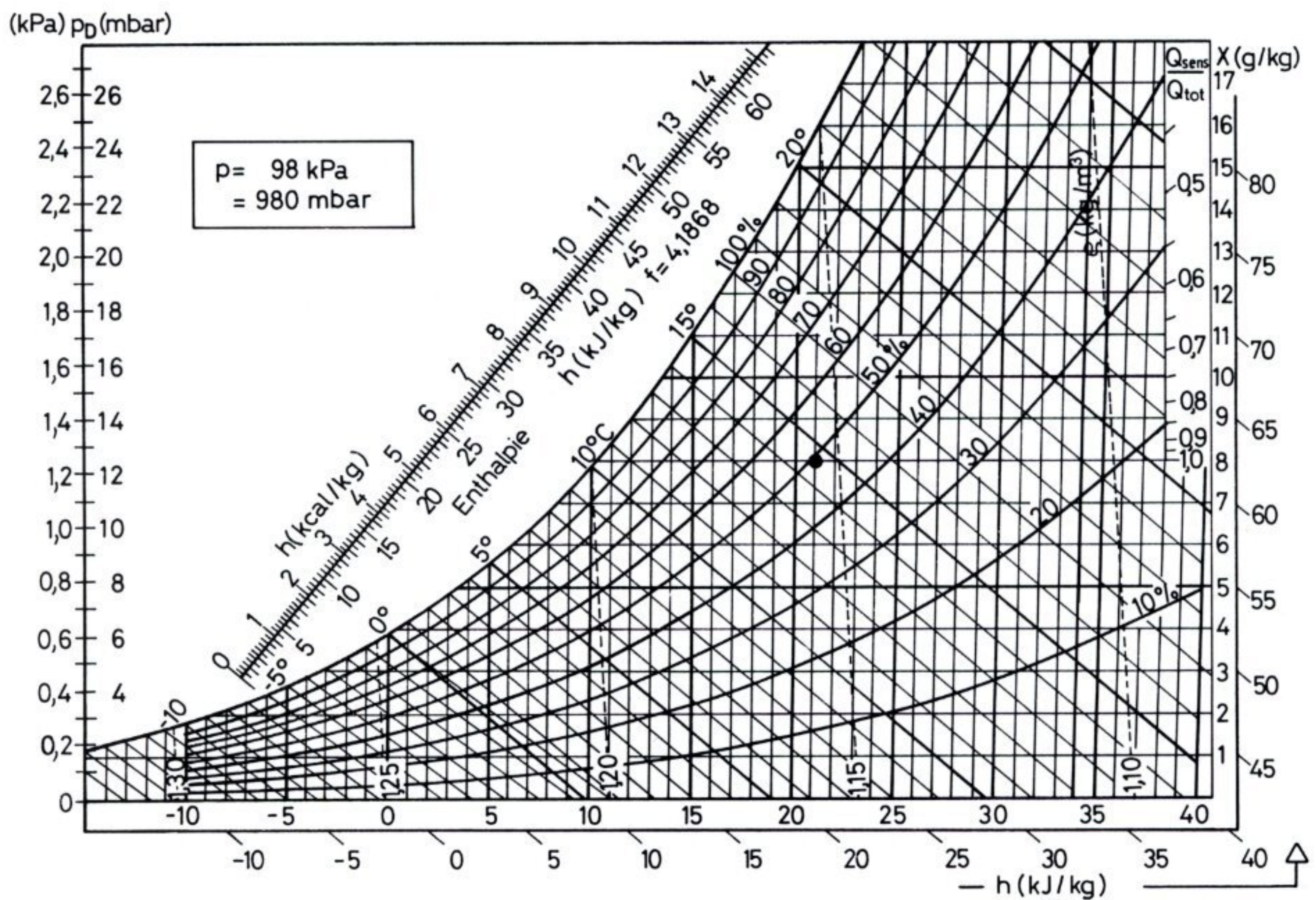
Positionner le point **B** : **ts** = 25 °C et **Hr** = 50 %

Déterminer toutes ses caractéristiques physiques.

Exercice 1

Désignation	Symbole	Unité	Point A
Température de bulbe sec	ts	° C	25° C
Humidité absolue	x (W)	g/kg	
Pression partielle	P	kPa	
Température de rosée	tr	° C	
Humidité relative	φ	%	50 %
Enthalpie	h	kJ/kg	
Température de bulbe humide	th	° C	
Masse volumique	ρ	kg/m3	

Complétez le tableau en utilisant le diagramme ci-dessous



Exercice 2

Positionner sur le diagramme de l'air humide les points donnés par deux de leurs caractéristiques et compléter le tableau suivant :

Caractéristiques	Point B	Point C	Point D	Point E
ts (° C)	20° C	25° C		
x (g/kg) (ω)			4 g/kg	
P (mbar)				
tr (° C)				
φ (%)		50 %		
h (hJ/kg)				10 kcal/kg
th (° C)	15° C		10°C	
ρ (kg/m³)				0,86 m³/kg

h-x diagramme p = 1013 m bar

Facteur de transformation										
	H	m	0	200	400	600	800	1000	1500	2000
	p	kPa	101,3	98,9	96,6	94,3	92,1	89,9	84,2	79,5
		m bar	1013	989	966	943	921	899	842	795
	k	φ	1	0,976	0,953	0,931	0,909	0,887	0,831	0,785
		ρ	1	0,976	0,953	0,931	0,909	0,887	0,831	0,785

- H Hauteur au dessus du niveau de mer
- p Pression
- k Facteur
- p_D Pression de vapeur d'eau
- h Enthalpie
- t_{mg} Température du bulbe humide
- t_{sc} Température du bulbe sec
- ρ Densité
- x Teneur en eau
- φ Humidité relative

Chauffage de l'air

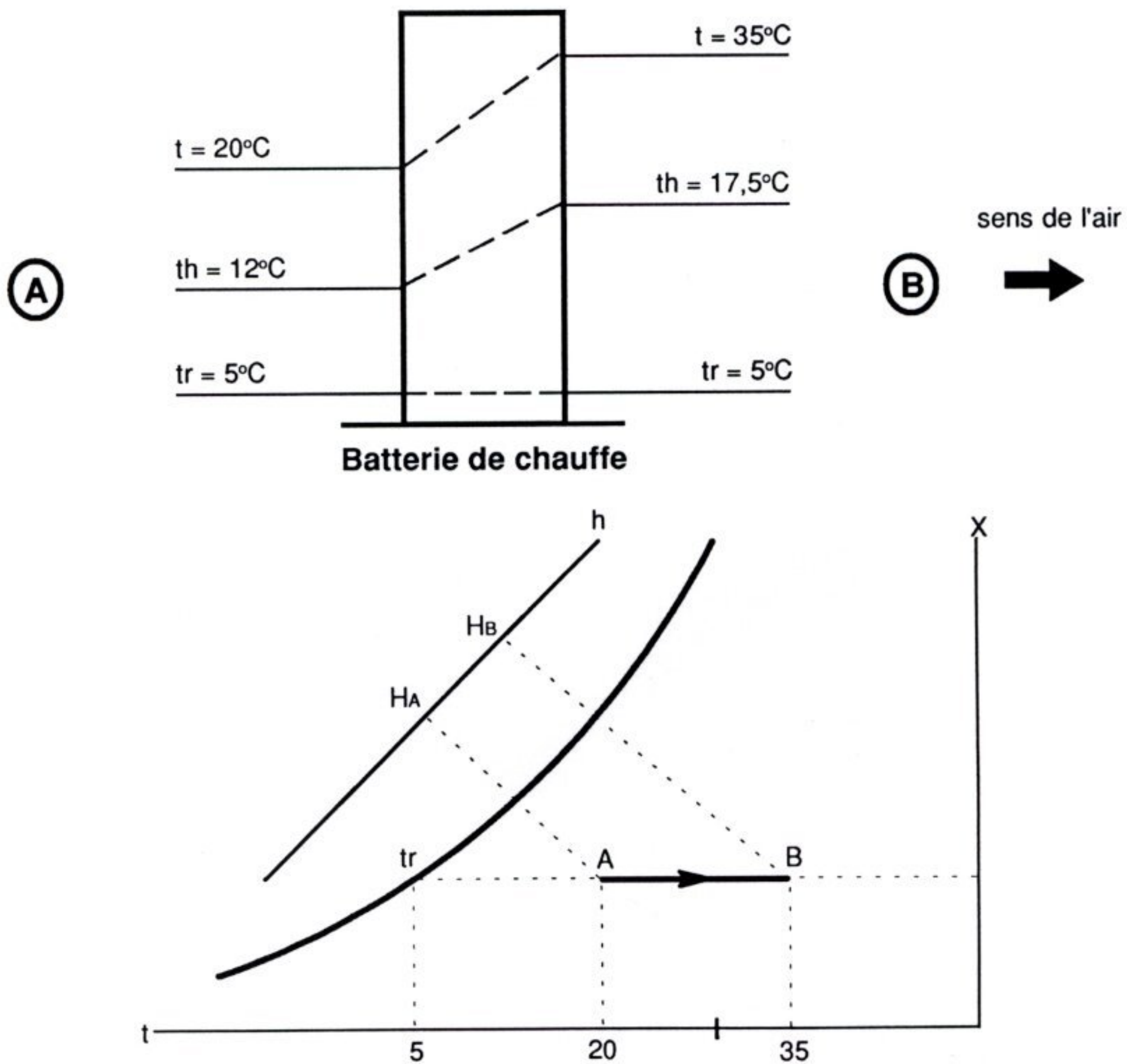
Evolution de l'air

Le chauffage est représenté sur le diagramme psychométrique par une horizontale entre les points **A** et **B**.

On remarque que lorsque la température sèche **t** augmente :

-la température de rosée tr reste constante

-l'humidité absolue x reste constante



Calcul de la puissance calorifique

La puissance calorifique de la batterie de chauffe, c'est-à-dire la quantité de chaleur fournie par unité de temps, peut être calculée à partir de la formule générale :

$$\phi = \rho \, . \, \mathbf{C} \, . \, \mathbf{qv} \, . \, \Delta\theta$$

avec ρ = masse volumique de l'air considéré

c = chaleur spécifique de l'air

qv = débit de l'air

$\Delta\theta = t_B - t_A$ = différence de température sèche entre l'entrée et la sortie de la batterie

Systèmes d'unités utilisés :

Φ	ρ	C	qv	Δθ
W	kg/m3	Wh/kg - ° C	m3/h	° C
kcal/h	kg/m3	kcal/kg - ° C	m3/h	° C

Les débits d'air indiqués dans les caractéristiques des équipements de climatisation sont basés sur un air dont l'état est dit «standard». Cet état correspond à la pression barométrique normale (1 013 mbar au niveau de la mer), à une température sèche de 21°C et à un degré hygrométrique de 50 %.

La masse volumique de cet air standard est : 1,18 kg/m3.

La chaleur spécifique est :
C = 0,24 kcal/kg - ° C
C = 0,28 Wh/kg - ° C

La formule générale donnée plus haut prend les formes suivantes selon le système d'unités :

Φ en kcal/h $\Phi = \mathbf{0{,}29.qv.}\Delta\theta$

Φ en W $\Phi = \mathbf{0{,}34.qv.}\Delta\theta$

On utilise parfois dans les calculs le débit masse qm (kg/h) de l'air au lieu du débit volume :

$$qm = \rho . qv \quad \text{et} \quad \boxed{\Phi = qm \, . \, C \, . \, \Delta\theta}$$

Calcul par le diagramme de l'air humide

Il est évident, que la température de soufflage dans un local chauffé à l'air chaud, doit être supérieure à celle que l'on désire y maintenir. Cet air soufflé, en se refroidissant jusqu'à la température du local, libère une quantité de chaleur, qui doit être suffisante pour compenser les déperditions. Si l'air que l'on fait passer sur la batterie est uniquement de l'air de reprise, la quantité de chaleur libérée dans le local sera égale à la puissance calorifique de la batterie de chauffe. Par contre, si l'on admet une certaine quantité d'air extérieur, la puissance de la batterie de chauffe est supérieure à celle qui est libérée dans le local.

Des valeurs numériques sensiblement égales à celles résultant de l'application de la relation précédente peuvent être obtenues en utilisant le diagramme psychrométrique. En effet, si sur la figure 1, on apelle h_A et h_B les enthalpies correspondant aux points A et B, on aura :

$$\Phi = qm \, . \, (h_B - h_A)$$

$$\boxed{\Phi = qm \, . \, \Delta h = \rho \, . \, qv \, . \, \Delta h}$$

Systèmes d'unités utilisés :

Φ	qm	Δh
W	kg/s	J/kg
	kg/h	Wh/kg
kcal/h	kg/h	kcal/kg

<u>Remarque</u> :

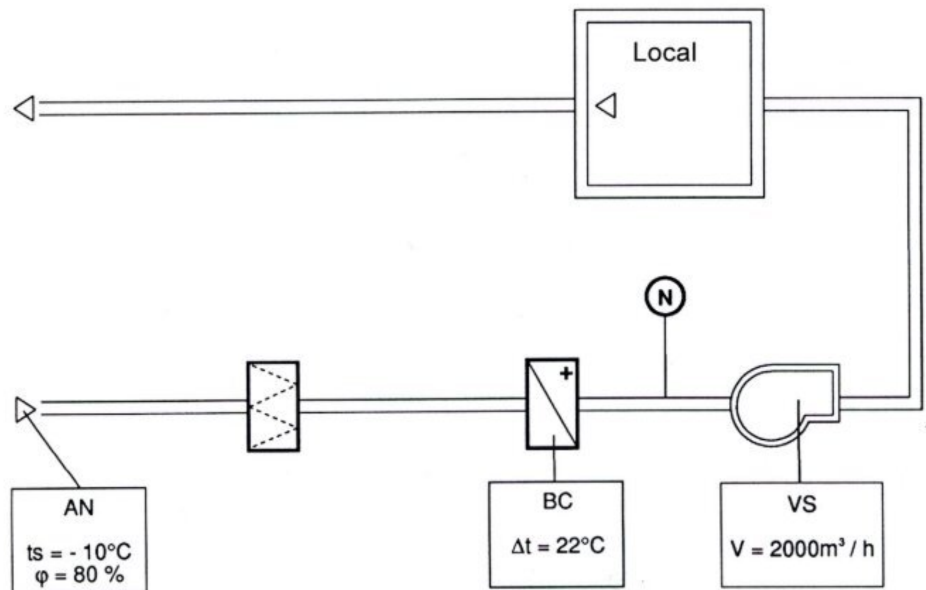
Une telle transformation ne modifie que la chaleur sensible de l'air considéré.

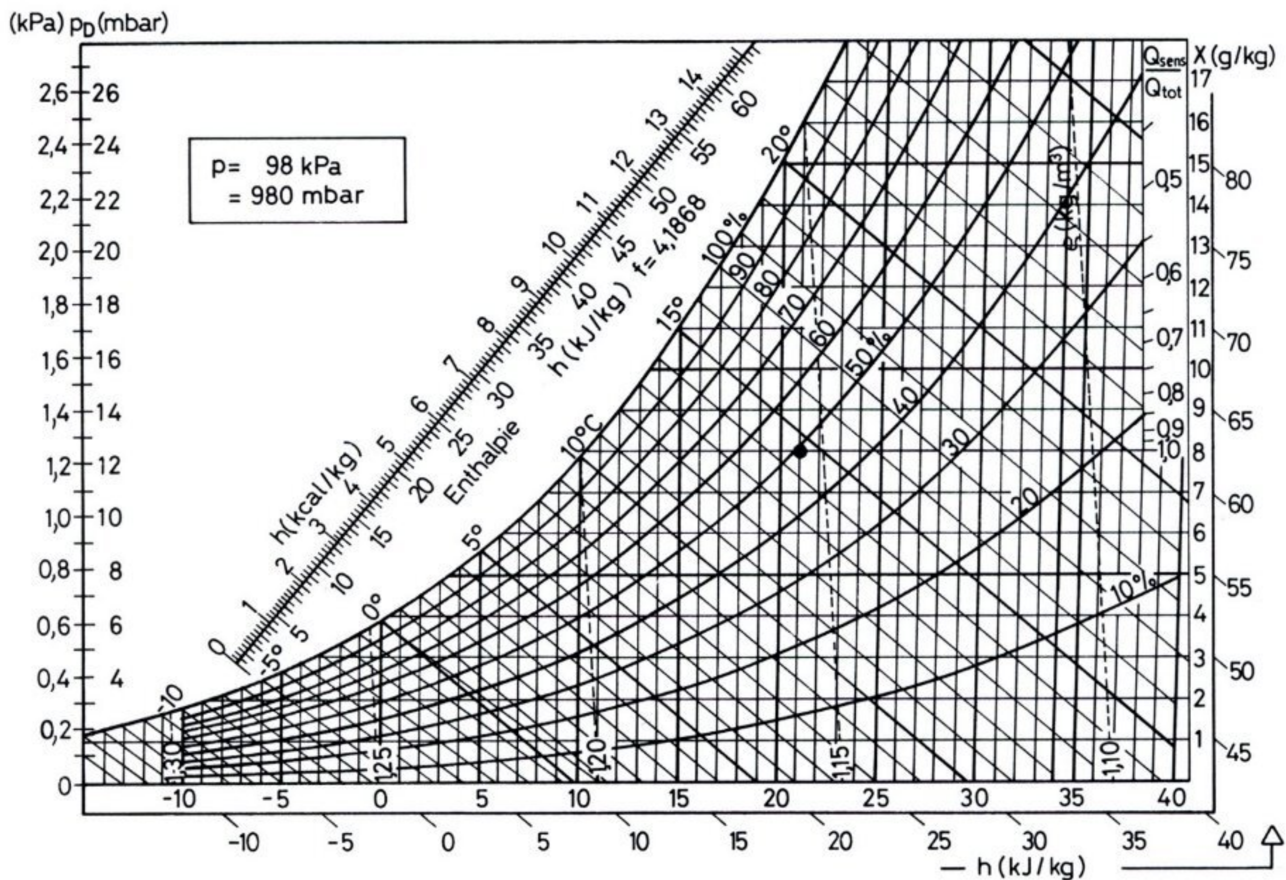
Exercice 3

Dans cette installation de ventilation 2 000 m³/h d'air sont chauffés à l'aide de la batterie **BC**. Il s'agit de déterminer :

1- Les caractéristiques du point **N** à la sortie de la batterie **BC**.

2- La puissance de la batterie **BC**.





	N
ts	
φ	
x	

Puissance batterie **BC** = …

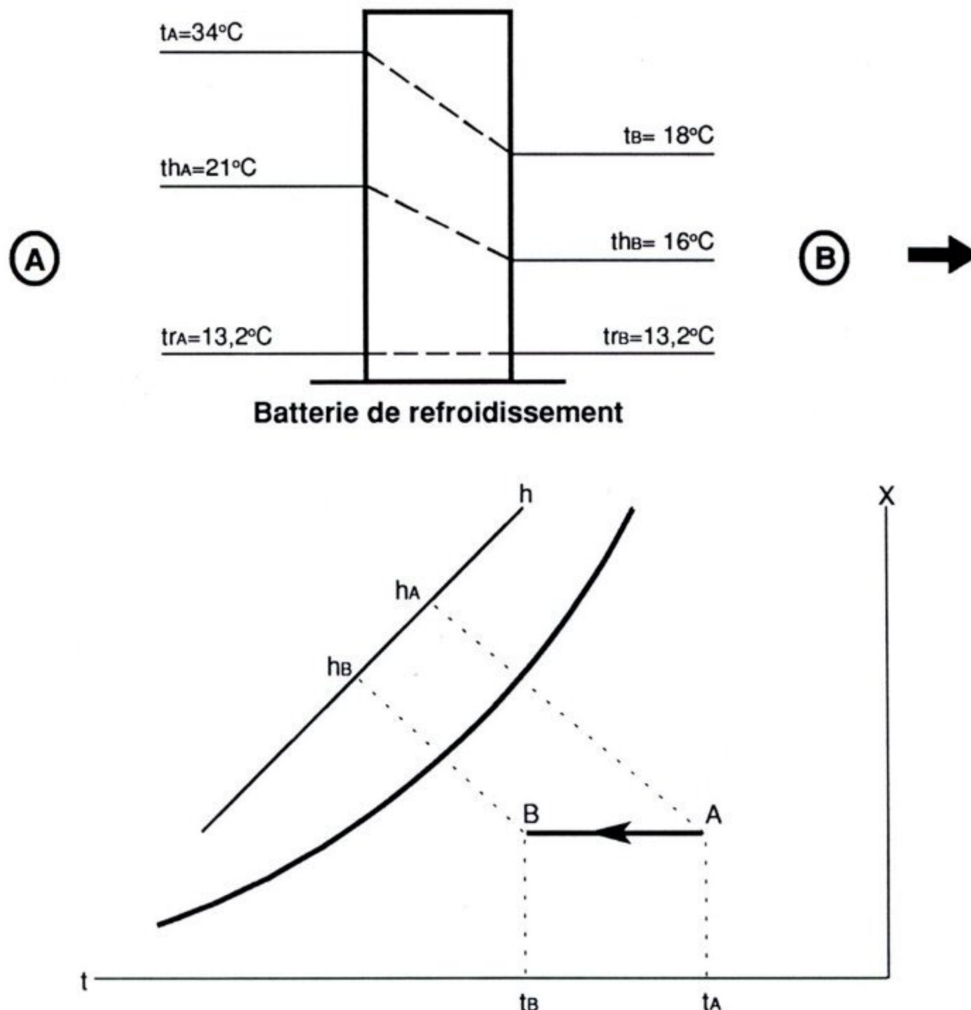
Refroidissement de l'air

Le refroidissement est représenté sur le diagramme psychométrique par une horizontale entre les points **A** et **B**.

Il s'agit donc d'une transformation inverse du chauffage.

On remarque que lorsque la température sèche diminue :

- la température de rosée reste constante,
- l'humidité absolue reste constante.



Pour calculer la puissance d'une batterie de refroidissement on utilise les mêmes formules que précédemment :

$\Phi = 0{,}29 \cdot qv \cdot \Delta\theta$ avec $\Delta\theta = \theta_A - \theta_B$

ou $\Phi = qm \cdot \Delta h$ avec $\Delta h = h_A - h_B$

Remarque :

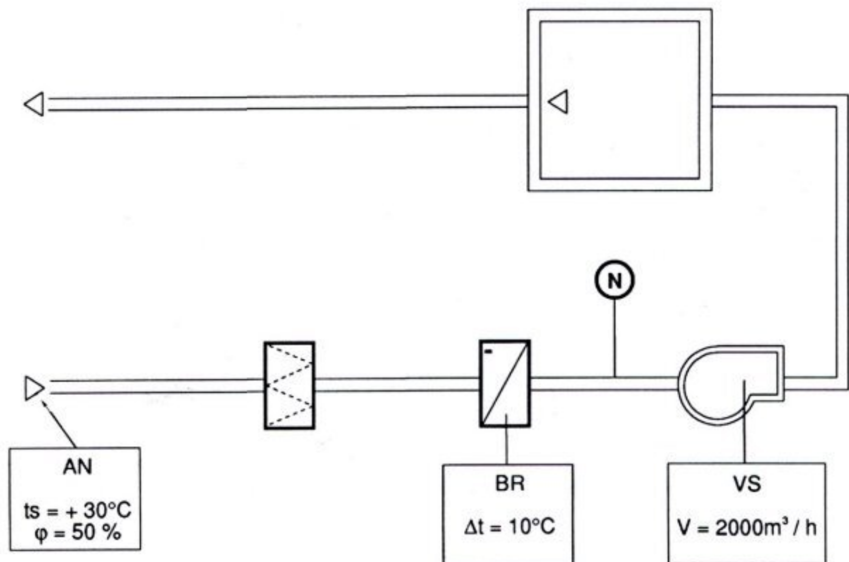
Une telle transformation ne modifie que la chaleur sensible de l'air considéré.

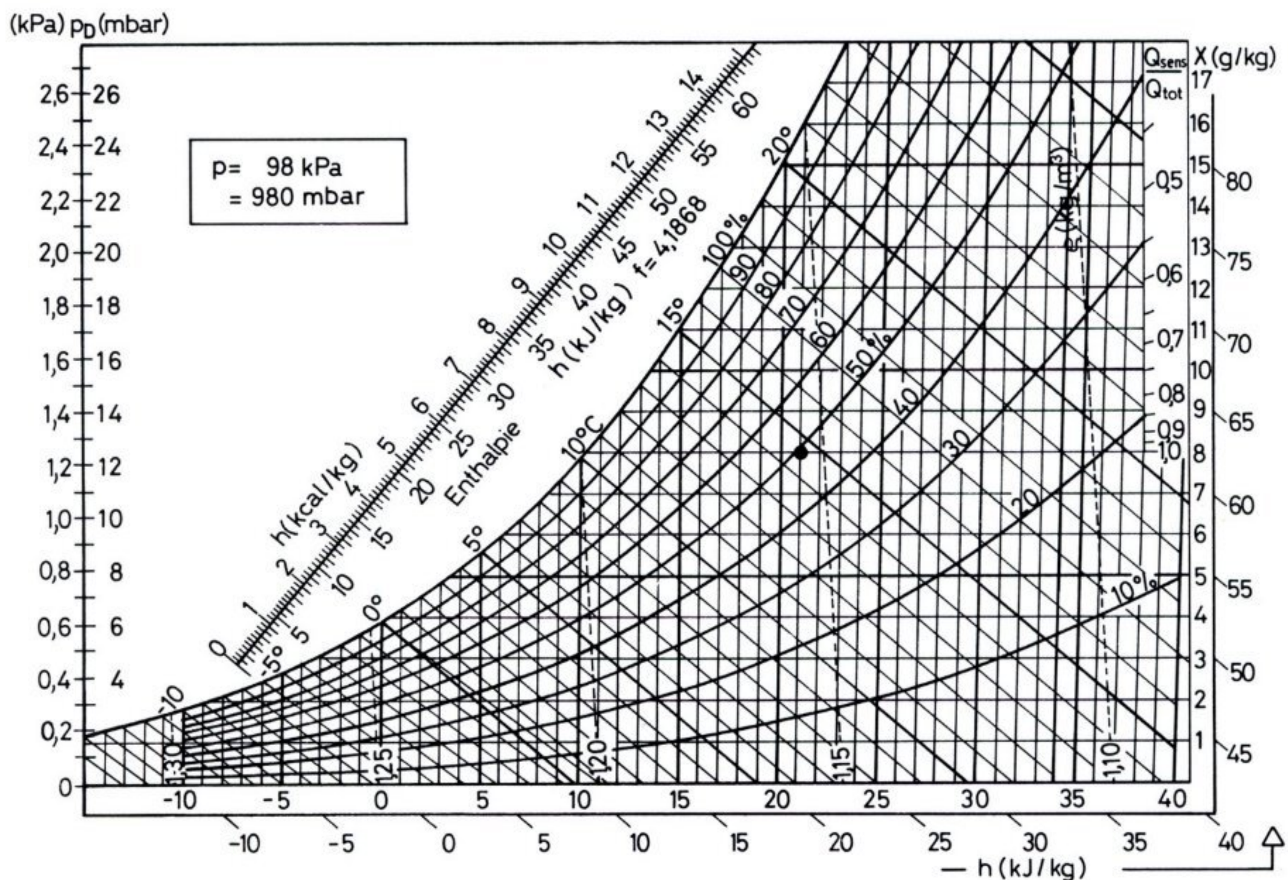
Exercice 4

Dans cette installation de ventilation 2 000 m³/h sont refroidis à l'aide de la batterie **BR**. Il s'agit de déterminer :

1- Les caractéristiques du point **N** à la sortie de la batterie **BR**.

2- La puissance de la batterie **BR**.





	N
ts	
φ	
x	

Puissance de la batterie **BR** = …

Refroidissement et déshumidification de l'air

> Le refroidissement de l'air, à une température inférieure à son point de rosée, s'accompagne toujours d'une déshumidification.

La diminution de température sèche s'accompagne de :

- la diminution de la température de rosée,
- la diminution de l'humidité absolue.

Une telle transformation modifie à la fois la chaleur sensible et la chaleur latente de l'air considéré.

Batterie de réfrigération avec une efficacité de 100 %

De l'air pris dans les conditions **A** : **ts** = +27 °C et **th** = +20,3 °C doit être refroidi aux conditions **B** : **ts** = +10 °C.

Le diagramme psychométrique permet de déterminer les caractéristiques des points **A** et **B**.

Caractéristiques de A

température sèche	**ts**	=	+27 °C
température humide	**th**	=	+20,3 °C
enthalpie	**h**	=	+14 kcal/kg
humidité absolue	**w**	=	12,2 g/kg
température de rosée	**tr**	=	+17 °C

Caractéristique de B

température sèche **ts** = +10 °C

Comme l'efficacité de la batterie est de 100% le point de sortie se trouve sur la courbe de saturation.

enthalpie	**h**	=	7 kcal/kg
humidité absolue	**w**	=	7,6 g/kg

Sur le diagramme psychrométrique l'évolution de l'air humide est représenté par le segment de droite **AB.**

C'est la **droite d'évolution de l'air**

(Refroidissement et déshumidification)

Calculs par le diagramme

La différence des lectures respectives d'enthalpies des points A et B, soit + 14 - (+ 7) = 7 kcal représente la **chaleur totale** à enlever qui se compose de la **chaleur latente** et de la **chaleur sensible.**

- **La chaleur latente** est représentée par la portion «AL» de l'isotherme + 27 limitée par les 2 isohydres passant respectivement par les points A et B. L'écart d'enthalpies correspond : + 14 - (+ 11,2) = 2,8 kcal donne la quantité de chaleur représentée par la chaleur latente seule (partie C1).

- **La chaleur sensible** est représentée par la portion «LB» de l'isohydre passant par
le point B. L'écart d'enthalpies correspond : + 11,2 - (+ 7) = + 4,2 kcal donne la quantité de chaleur représentée par la chaleur sensible seule (partie Cs).

- **La chaleur totale** : C1 + Cs = + 2,8 + 4,2 = + 7 kcal

NOTA : Le coefficient de la pente ou valeur de la droite d'évolution de l'air est déterminé par le rapport :

$$S.H.F. = \frac{Cs}{Ct} = \frac{\text{Chaleur sensible}}{\text{Chaleur totale}}$$

dans l'exemple ci-dessus :

$$S.H.F. = \frac{Cs}{Ct} = \frac{4,2}{7} = 0,6$$

La quantité d'eau enlevée est représentée par la différence des valeurs de teneur en eau entre l'air point A et l'air point B soit 12,2 - 7,6 = 4,6 g.

Batterie de réfrigération avec une efficacité inférieure à 100 %

Dans ce cas, l'air sortant à + 10° C n'est pas sur la courbe de saturation, mais sur une autre courbe d'égale humidité relative de valeur inférieure.

> C'est la connaissance des caractéristiques de la batterie qui permet de déterminer le point de sortie.

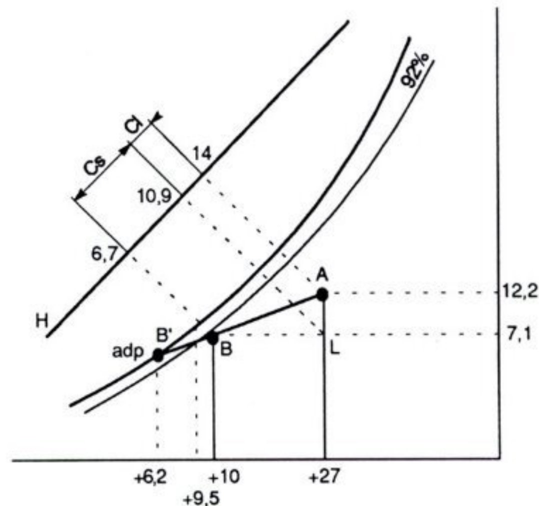
La prolongation de la droite d'évolution vers la courbe de saturation détermine à l'intersection une température dite température équivalente de surface de la batterie (t_{ES} ou a.d.p.).

Cette température est choisie pratiquement de la manière suivante :

+ pour une batterie à détente directe dont la température d'évaporation est t_o :

$$t_{ES} = t_o + (4 \text{ à } 6)° C$$

(Refroidissement et humidification)



Caractéristiques des poins **A** et **B**

	Point A	Point B
Température sèche	27° C	10° C
Température humide	20,3° C	9,5° C
Température de rosée	17° C	8,8° C
Humidité absolue	12,2 g/kg	7,1 g/kg
Enthalpie	14 kcal/kg	0,7 kcal/kg

Le point **B'** représente la température équivalente de surface de la batterie, soit 6,2 °C.

Caractéristiques de la batterie

Chaleur sensible : **Cs** = 10,9 – 6,7 = **4,2** kcal/kg

Chaleur latente : **Cl** = 14 – 10,9 = **3,1** kcal/kg

Chaleur totale : **Ct** = Cs + Cl = **7,3** kcal/kg

Efficacité : $\mathbf{E} = \frac{BA}{B'A} \times 100 = \frac{19 \times 100}{27} = \mathbf{70\ \%}$

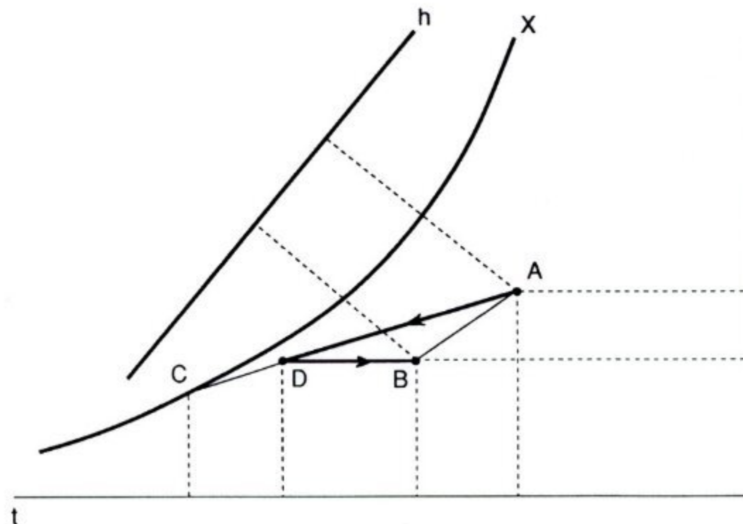
Facteur de by-pass :

On utilise souvent ce facteur à la place de l'efficacité :

$\mathbf{B.P.F.} = \frac{BB'}{B'A} \times 100$ soit $\mathbf{B.P.F.} = 100 - E$

(Refroidissement et humidification)

Cas où la droite d'évolution de l'air ne coupe pas la courbe de saturation



On désire obtenir des conditions de soufflage **B** à partir d'un air **A**. La droite d'évolution de l'air **AB** ne coupe pas la courbe de saturation.

Pour obtenir le point **B** il faut d'abord procéder à un refroidissement avec déshumidification de **A** à **D** puis à un chauffage de **D** à **B**.

Le point **D** est situé sur une isohydre passant par **B** et sur la droite d'évolution del'air, à travers la batterie de réfrigération, qui coupe la courbe de saturation en **C**.

Les points **A**, **D** et **C** nous permettent de déterminer les caractéristiques de la batterie froide :

- température équivalente de surface
- efficacité
- puissance.

Les points **D** et **B** nous permettent de déterminer la puissance de la batterie de chauffage.